

# Strukturkalkens inverkan på såbäddens aggregategenskaper

– en studie inriktad på strukturkalkning av lättleror

The impact of structure lime on seedbed aggregate characteristics

– a study targeted on structure lime treatments on loamy clay soils

*Hjalmar Tindberg*



# Strukturkalkens inverkan på såbäddens aggregategenskaper

The impact of structure lime on seedbed aggregate characteristics

*Hjalmar Tindberg*

**Handledare:** Sven-Erik Svensson, SLU, Inst. för biosystem och teknologi

**Btr. handledare:** Jens Blomquist, Agraria Ord & Jord

**Examinator:** Håkan Asp, SLU, Inst. för biosystem och teknologi

**Omfattning:** 10 hp

**Nivå och fördjupning:** Grundnivå, G1E

**Kurstitel:** Examensarbete för lantmästarprogrammet inom lantbruksvetenskap

**Kurskod:** EX0619

**Program/utbildning:** Lantmästare - kandidatprogram

**Utgivningsort:** Alnarp

**Utgivningsår:** 2018

**Omslagsbild:** Jens Blomquist, 2017

**Elektronisk publicering:** <http://stud.epsilon.slu.se>

**Nyckelord:** strukturkalk, kalk, lättlera, lerjord, aggregatstabilitet, marklära, limestone, structure lime, aggregate stability, loamy clay soil



Sveriges lantbruksuniversitet  
Swedish University of Agricultural Sciences

Fakulteten för landskapsarkitektur, trädgårds-  
och växtproduktionsvetenskap  
Institutionen för biosystem och teknologi

# FÖRORD

Lantmästare - kandidatprogrammet är en treårig universitetsutbildning vilken omfattar 180 högskolepoäng (hp). Efter två år är det möjligt att ta ut en Lantmästarexamen, vilken omfattar 120 hp. En av de obligatoriska delarna i denna är att genomföra ett självständigt arbete som presenteras med en skriftlig rapport och ett seminarium. Arbetet kan till exempel ha formen av ett mindre försök som utvärderas och/eller en litteraturstudie med analys av tidigare presenterade iakttagelser och resultat. Arbetsinsatsen ska motsvara minst 6,5 veckors heltidsstudier (10 hp).

Jag har själv länge haft ett stort intresse för växtodling och marklära. Ett särskilt intresse för de praktiska åtgärder och insatser som kan göras för att förbättra odlingsförutsättningar, ekonomi och hållbarhet hos enskilda lantbruksföretag har på senare år vuxit sig starkare hos mig. Det kändes därför som en självklarhet att genomföra en studie med anknytning till växtodling.

Arbetet har genomförts i ett nära samarbete med Anita Gunnarsson, Hushållningssällskapet Skåne och Jens Blomquist, Agraria Ord & Jord, vilka också kom med förslaget om att undersöka strukturfalkens inverkan på aggregategenskaperna i såbädden.

Ett stort tack riktas till Jens Blomquist som bidragit med värdefull kunskap, goda råd och handledning vid den praktiska provtagningen i fält såväl som vid analys av insamlade data. Ett stort tack riktas även till Anita Gunnarsson, som gav mig tillträde till försöksplatserna inom ett större kalkförsök, vilket möjliggjorde de provtagningar som utgjort grunden i denna studie. Åsa Olsson vid Nordic Beet Research har hjälpt mig med värdefulla data, texturanalyser och information från försöksplatserna, för det ska hon ha ett tack. För handledning i den statistiska bearbetningen av insamlade data riktas också ett tack Adam Flöhr vid SLU. Ett tack riktas även till Sven-Erik Svensson vid SLU, som med övergripande handledning och granskning har gjort detta arbete möjligt att genomföra.

Ett tack riktas även till Hushållningssällskapet som bidragit med ekonomisk ersättning för de resor som ingått i denna studie.

Håkan Asp vid SLU har varit examinator.

Alnarp, maj 2018

Hjalmar Tindberg

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD.....	1
SAMMANFATTNING .....	3
ABSTRACT.....	5
INLEDNING.....	7
BAKGRUND.....	7
SYFTE.....	8
MÅL OCH FRÅGESTÄLLNING.....	8
AVGRÄNSNING.....	8
LITTERATURSTUDIE.....	9
OLIKA TYPER AV KALK.....	9
BEGREPPSFÖRKLARINGAR.....	10
<i>Katjonutbyteskapacitet</i> .....	10
<i>Basmätnadsgrad</i> .....	10
ALLMÄNT OM KEMISKA PROCESSER I MARKEN VID KALKNING.....	10
KEMISKA REAKTIONER I MARKEN VID TILLFÖRSEL AV BRÄND ELLER SLÄCKT KALK.....	11
<i>Basutbyte</i> .....	11
<i>Puzzolanreaktion</i> .....	12
<i>Murbruksbildning</i> .....	12
RESULTAT FRÅN TIDIGARE FÖRSÖK MED STRUKTURKALKNING.....	13
STRUKTURKALKNING I PRAKTIKEN.....	14
MATERIAL OCH METOD .....	15
FÖRSÖKSUPPLÄGG.....	15
<i>Kalkbehandling och nedbrukning</i> .....	16
<i>Jordbearbetning och sådd före provtagning</i> .....	17
METOD FÖR AGGREGATSTORLEKSKATEGORISERING I SÅBÄDDEN.....	18
METOD FÖR MÄTNING AV TURBIDITET.....	20
STATISTISK ANALYS.....	21
RESULTAT.....	22
AGGREGATSTORLEKSFÖRDELNING.....	22
<i>Aggregat &lt;2 mm</i> .....	22
<i>Aggregat 2–5 mm</i> .....	23
<i>Aggregat &gt;5 mm</i> .....	23
AGGREGATSTABILITET.....	24
DISKUSSION.....	26
AGGREGATSTORLEKSFÖRDELNING.....	26
AGGREGATSTABILITET.....	27
RESULTATENS SÄKERHET.....	28
FRAMTIDA STUDIER.....	28
SLUTSATS.....	29
REFERENSER.....	30
SKRIFTLIGA.....	30
WEBBPLATSER.....	31
ICKE PUBLICERAT MATERIAL.....	31
BILAGA 1.....	32

## SAMMANFATTNING

Kalkning är en åtgärd som bidrar till att förbättra åkerjordens beskaffenhet och höja grödors avkastningspotential. Det finns flera olika typer av kalkning. Ett exempel är traditionell kalkning som syftar till att höja pH i jorden genom tillförsel av kalkstensmjöl. En annan typ av kalkning som blivit allt vanligare på framför allt lerjordar är så kallad strukturkalkning, vilket i flera försök har visat sig ge en markstrukturförbättrande effekt genom stabilisering av lerpartiklar i jorden.

Begreppet strukturkalk används för bränd kalk ( $\text{CaO}$ ) och släckt kalk ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) men används idag också ofta för blandningar av bränd och/eller släckt kalk tillsammans med kalkstensmjöl ( $\text{CaCO}_3$ ). Kalciumet i bränd och släckt kalk är kemiskt bundet som antingen oxid eller hydroxid, vilket skiljer dem från kalkstensmjöl där kalcium är kolsyrabundet som kalciumkarbonat. Kalciumoxid och kalciumhydroxid är känt för att vara betydligt mer lösligt än kalciumkarbonat. De kan snabbt avge stora mängder kalciumjoner efter spridning och nedbrukning i gynnsamma förhållanden. Det snabba frigörandet av kalciumjoner utlöser en kedja av reaktioner som tillsammans resulterar i att ge stabiliserande och strukturförbättrande effekt på lerkolloiderna i jorden. Strukturkalk har således en positiv effekt på markstrukturen på lerhaltiga jordar.

I den aktuella studien har strukturkalkens effekt på aggregatstabilitet och aggregatstorleksfördelning (brukbarhet) i såbädden på lättleror studerats. En praktisk undersökning innefattande provtagning och analys har genomförts på sex olika försöksplatser runt om i Skåne, våren 2017. Dessa försök var alla upplagda som blockförsök där de behandlade leden hösten 2015 tillfördes strukturkalk (4 ton  $\text{CaO}$  per ha) eller kalkstensmjöl (4 ton  $\text{CaO}$  per ha). De två behandlingsleden jämfördes dels med varandra och dels med ett led som lämnats obehandlat.

Vid undersökningen av såbäddens aggregatstorleksfördelning sållades jorden till tre olika fraktioner:  $>5$  mm, 2–5 mm,  $<2$  mm. Aggregatstabiliteten undersöktes genom mätningar av turbiditet (grumlighet) i dräneringsvattnen från jordprov som utsatts för regnsimulering. Värdena från de två undersökningarna analyserades med ANOVA utifrån signifikansnivån 5 %. Statistisk signifikans förelåg om  $p < 0,05$ .

Resultaten från aggregatstorlekskategoriseringen visade att de led som behandlats med kalkstensmjöl hade ett statistiskt signifikant lägre innehåll av aggregat i den grövre kategorin ( $>5$  mm) jämfört med de obehandlade leden ( $p = 0,016$ ). Likaså sågs en tendens till att såbädden i de led som tillförts strukturkalk eller kalkstensmjöl innehöll en större mängd finjord (aggregat  $<2$  mm) än vad den gjorde i de obehandlade leden ( $p = 0,069$ ).

Turbiditetsmätningarna, som mätte aggregatstabiliteten, visade att dräneringsvattnet från jorden i de behandlade leden hade signifikant lägre turbiditet (grumlighet) än det som kom från de obehandlade leden ( $p = 0,000$ ).

Detta examensarbete har genom provtagningar i fältförsök och litteraturstudier lett fram till följande slutsatser:

- Strukturkalk och kalkstensmjöl hade positiv inverkan på aggregatstorleksfördelningen i såbädden på lättloror. Försöken visade att jord som behandlats med kalkstensmjöl hade ett signifikant lägre innehåll av grova aggregat ( $>5$  mm) än jord som var obehandlad ( $p = 0,016$ ). Strukturkalk och kalkstensmjöl tenderade att göra jorden mer lättbrukad på våren, vilket gav en större mängd finjord ( $<2$  mm aggregat) utan att sätta in fler jordbearbetande överfarter.
- Behandling med strukturkalk eller kalkstensmjöl kan öka aggregatstabiliteten i såbädden på lättloror, vilket minskar risken för partikulära fosforförluster till vatten som dräneras genom matjordsprofilen.
- Kalkstensmjöl hade bättre effekt på aggregatstorleksfördelning (brukbarhet) och aggregatstabilitet (turbiditet) i såbädden på lättloror än vad som var förväntat.
- Bra markförhållanden och rätt anpassad metod vid nedbrukning och inblandning är avgörande för att nå önskad effekt av den utförda kalkbehandlingen. Det är av stor vikt att kalkprodukten brukas ner och blandas in till det djup som jorden normalt brukas.

## ABSTRACT

Limning is a measure that enhances soil quality and raises crop yield potential. There are different types of lime, an example is traditional liming with limestone powder to raise pH. Another type of lime treatment becoming more common on clay soils is structure liming. Results from several field trials has shown that structure liming improves soil structure through stabilisation of the clay aggregates.

Structure lime is a concept that refers to either burnt lime ( $\text{CaO}$ ) or slaked lime ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), but is also commonly used for mix products that consist burnt or slaked lime and limestone powder ( $\text{CaCO}_3$ ). The calcium in burnt and slaked lime is chemically bound as oxide or hydroxide, which is their main difference from limestone powder, in which calcium is carbonic acid bound as calcium carbonate. Calcium oxide and calcium hydroxide have a higher solubility compared to calcium carbonate. They can rapidly release big amounts of calcium ions after being spread and tilled down into the soil. The rapid release of calcium ions starts a chain of reactions that improve soil structure by stabilising the clay aggregates. Thereby structure lime will only be able to improve soil structure on clayey soils.

The aim of the present study was to investigate the impact of structure lime treatment on aggregate stability and aggregate size distribution in seedbed on loamy clay soils. Lime products were spread and tilled down in soil in six different field trials in the county of Skåne, Sweden, in fall 2015. The soil in the field trials had a clay content of 19-27 %. The trials were arranged as randomised block design containing three different treatments: *K1* – untreated, *K2* – limestone powder (4 tons  $\text{CaO}$  per hectare), *K3* – structure lime “Nordkalk Aktiv Struktur” (4 tons  $\text{CaO}$  per hectare). The field work including sampling and analysing of soil was completed in the same six field trials in spring of 2017.

When analysing the aggregate size distribution, the soil was sifted into three size categories:  $>5$  mm, 2-5 mm,  $<2$  mm averages aggregate diameter. The aggregate stability of aggregates in the middle fraction 2-5 mm was investigated through turbidity tests, where the soil samples were treated with rain simulations. The turbidity was measured in the water drained from the soil samples. All results were statistically analysed with ANOVA, using the confidence level of 5 %. Results were statistically significant when  $p < 0,05$ .

The results from analysing seedbed aggregate size distribution showed that plots treated with limestone powder had significantly fewer coarse aggregates ( $>5$  mm) compared to the untreated plots ( $p = 0,016$ ). The soil in plots treated with structure lime and limestone powder had a tendency of containing more fine aggregates ( $<2$  mm) compared to the soil in untreated plots ( $p = 0,069$ ).

Turbidity tests showed that water drained through soil treated with either of the two lime products had a significantly lower turbidity than water that had been drained through untreated soil ( $p = 0,000$ ). This indicates a higher aggregate stability in soil treated with structure lime or limestone powder.

The following conclusions are based on the present field studies and studying the literature:

- Structure lime and limestone powder had a positive impact on aggregate size distribution in seedbed on loamy clay soils. Results showed that soil treated with limestone powder had significantly less coarse aggregates ( $>5$  mm) as compared to untreated soil ( $p = 0,016$ ). Structure lime and limestone powder tended to make the soil easier to till in the spring, which increased the seedbeds content of fine aggregates ( $<2$  mm) without further cultivation passes.
- Treatment with structure lime or limestone powder enhanced aggregate stability and decreased turbidity in water drained through the seedbed.
- Limestone powder had a better impact on seedbed aggregate size distribution and aggregate stability in loamy clay soils than expected.
- Soil conditions and method for tilling down the lime product are critical factors for lime treatment results. It is important that the lime product is tilled down and mixed in at a depth where the soil is normally cultivated.



# INLEDNING

## Bakgrund

Modernisering och utveckling av teknik och produktionsmetoder har under långt tid bidragit till att höja skördar och effektivisera arbete inom lantbruket. I takt med att den tekniska utvecklingen har höjt skördarna har kraven också ökat på egenskaperna i åkermarken och dess närliggande miljöer. För att nå närmre grödornas fulla avkastningspotential krävs att förbättringar sker för samtliga av de begränsande faktorerna.

Ett exempel på en förbättrande åtgärd är kalkning, vilket i huvudsak genomförs för att höja pH. Syftet med denna insats är att kompensera för förurning av marken, som bland annat sker till följd av gödsling med ammoniumhaltiga produkter och surt nedfall från luften (Fogelfors, 2015).

Det har i mer modern tid blivit känt att kalkning av framför allt lerjordar bidrar till mer än att bara höja pH. Genom flera studier och försök har man kunnat konstatera att särskilda kalkprodukter (bränd och släckt kalk) har en positiv inverkan på aggregatstabilitet och struktur i jorden.

Enligt Berglund (1971) är de flesta jordar vid gynnsamma förhållanden lättbrukade och smuliga. De "reder sig" vid bearbetning och skapar en grynig struktur. De är inte onormalt känsliga för packning och har en god struktur som gör att dessa egenskaper bibehålls även vid blötare och torrare förhållanden. Hos jordar med försämrad struktur och instabila aggregat gäller dock inte detta. De kännetecknas ofta av en hög benägenhet att bli smetiga och sega vid hög fuktighet, och tvärtom, mycket hårda vid torka.

Målsättningen är generellt att jorden ska ha en så pass god struktur och aggregatstabilitet att den reder sig även vid viss nederbörd, eller vid aningen för torra förhållanden. För att åstadkomma detta finns det en rad åtgärder att tillämpa i systemet för sin växtodling och vid utförandet av rutinerna i fält. En av dessa åtgärder är att tillföra jorden så kallad struktorkalk. Begreppet struktorkalk används för bränd kalk ( $\text{CaO}$ ) och släckt kalk ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) men används idag också ofta för blandningar av bränd och/eller släckt kalk tillsammans med kalkstensmjöl ( $\text{CaCO}_3$ ). Det är i försök konstaterat att denna typ av blandprodukt bland annat har en stabiliserande effekt på jordens lerpartiklar. Den stabiliserande effekten verkar strukturförbättrande och gör marken mer vattengenomsläpplig. Vid provtagningar av dräneringsvatten har det även visat sig att den aggregatstabiliserande effekten gör att mindre mängd jordpartiklar, och därmed mindre mängd partikulärt bunden fosfor, utlakas från jorden (Berglund et al., u.å.).

Flera lantbrukare har positiva erfarenheter av struktorkalkning. En sådan är att jorden ofta upplevs som mer lättbrukad och att det krävs färre överfarter för att skapa såbruk, jämfört med jord som inte blivit struktorkalkad (Berglund & Blomquist, 2015).

Många av de tidigare genomförda försöken och studierna om strukturalk har genomförts på jordar i klasserna mellanlera och styv lera, med lerhalter i intervallerna 25–40 % respektive 40–60 % (Eriksson et al., 2011). Enligt Kerstin Berglund et al. (u.å.) framgår det att man i ett långliggande försök på mellanlera och styv lera har konstaterat tydliga skillnader i aggregatstabilitet mellan de behandlade (strukturalkade) och obehandlade leden. Resultaten från försök med strukturalkning av lättlorer (lerhalter mellan 15 och 25 %) är inte alltid lika tydliga och framför allt inte lika många som för mellanlorer och styva loror.

## **Syfte**

Det bakomliggande syftet med detta arbete är att öka kunskaperna kring effekterna av strukturalkning på lättlorer. En allmänt ökad kunskap och konkreta underlag från försök kan i framtiden bidra till att underlätta beslutsfattandet kring vilken typ av kalkningsåtgärd som passar den enskilda jorden bäst. Som en del av detta kommer effekterna av strukturalkning att jämföras med effekterna av traditionell pH-kalkning, som utförts med kalkstensmjöl.

## **Mål och frågeställning**

Studiens mål är att analysera strukturalkens effekt på aggregatstabilitet, jordstruktur och aggregatstorleksfördelning (brukbarhet) i den övre matjordsprofilen på lättlorer. Denna analys byggs på resultaten från provtagningar i fältförsök, samt genom en studie av för området relevant vetenskaplig litteratur. Genom att även analysera effekterna av kalkning med kalkstensmjöl skapas möjligheter för att jämföra de två typerna av kalkprodukter och dess egenskaper i jorden. Studien genomsyras av två övergripande frågeställningar:

- Vilken mätbar effekt har strukturalkning på aggregatstabilitet och aggregatstorleksfördelning i lättlorer?
- Skiljer sig effekten av en strukturalkprodukt jämfört med kalkstensmjöl?

## **Avgränsning**

Studien avgränsas till sex olika försöksplatser i Skåne. Arbetet och frågeställningen kommer huvudsakligen att behandla strukturalkens effekter på aggregatstorleksfördelning och aggregatstabilitet i matjordens övre profil, närmare bestämt såbädden. Vid analys av strukturalkens effekter vägs två typer av resultat från försöken in. Dessa är storlekskategorisering av aggregaten i såbädden, samt resultat från (indirekta) mätningar av aggregatstabilitet, som skett genom mätning av turbiditet (grumlighet). Aggregatstorlekskategoriseringen sker i tre olika fraktioner: >5 mm, 2–5 mm och <2 mm i medeldiameter. Sammanvägningen av dessa resultat ligger sedan till grund för en analys och en diskussion kring strukturalkens effekt på aggregatstorleksfördelning och aggregatstabilitet i såbädden. Studien kommer dock inte att behandla strukturalkens inverkan på aspekter som ekonomi, grödors utveckling och avkastning.

## LITTERATURSTUDIE

### Olika typer av kalk

Den vanligaste typen av kalk för spridning på åkermark är kalkstensmjöl (Eriksson et al., 2011). Denna består av kalciumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ), vilket är kalcium i en kolsyrabunden form (Berglund, 1971). Denna kalk används i regel enbart för att höja pH i jorden. Kalkstensmjöl kan inte höja pH i jorden till mer än ca 8,1, och kan därför användas till så kallad förråds kalkning. Det innebär att en större mängd än det faktiska behovet kan tillföras, vilket då ger en typ av långtidsverkan som flyttar fram tidpunkten för då jorden behöver kalkas igen (Eriksson et al., 2011).

Det finns enligt Eriksson et al. (2011) två typer av kalk som kan användas för att snabbt förbättra strukturen på lerjordar. Den ena typen är bränd kalk, vilken består av kalciumoxid ( $\text{CaO}$ ). Den andra är släckt kalk, vilken istället består av kalciumhydroxid ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). De båda är kända för att ha jordstrukturförbättrande och stabiliserande effekter, vilket beror på dess kemiska egenskaper. Kalcium i form av oxid eller hydroxid har betydligt högre vattenlöslighet än kalciumkarbonat (Berglund & Blomquist, 2015). Detta i kombination med en hög reaktivitet gör dessa typer av kalk mycket snabbverkande, och ger dem den strukturförbättrande effekten, som senare beskrivs mer ingående.

Strukturkalk är den produkt som vanligen används för att stabilisera och förbättra strukturen i lerhaltiga åkerjordar. Enligt Berglund & Blomquist (2015) är detta en blandprodukt som vanligtvis innehåller ca 15 % släckt kalk ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) och resten, dvs. ca 85 %, kalkstensmjöl ( $\text{CaCO}_3$ ).

Kalcium är alltså bundet i olika former i olika typer av kalk, vilket gör det svårt att jämföra deras faktiska verkan utan att räkna. För att göra de olika kalkprodukterna jämförbara med varandra har man räknat fram deras syraneutraliserande förmåga, och uttryckt det i ett CaO-värde. Kalkstensmjöl, som är den vanligaste kalken för höjning av pH, har ca 50 % CaO-värde. Det kan jämföras med bränd och släckt kalk som har CaO-värden om 90 respektive 70 %. Kalkproduktens löslighet i vatten är en av de faktorer som spelar in i beräkningen av detta värde. Den höga vattenlösligheten hos bränd och släckt kalk bidrar därför till att CaO-värdet blir högre än vad det är för kalkstensmjöl (Berglund & Blomquist, 2015).

**Tabell 1.** Kemisk beteckning, syraneutraliserande förmåga uttryckt i CaO-värde samt mängd fri kalk för några av de inom jordbruket vanligast förekommande typerna av kalk (Berglund & Blomquist, 2002)

Kalkningsmedel	Kemisk beteckning	Motsvarande % CaO	% fri kalk
Kalkstensmjöl	$\text{CaCO}_3$	42-52	0
Bränd kalk	$\text{CaO}$	70-90	70-90
Släckt kalk	$\text{Ca(OH)}_2$	55-70	55-70
Sockerbrukskalk	$\text{CaCO}_3^*$	20-25	-

\*huvudsakligen  $\text{CaCO}_3$  se vidare tabell 5

## Begreppsförklaringar

### *Katjonutbyteskapacitet*

Katjoner är positivt laddade joner, och utbyteskapaciteten för dessa förkortas CEC (cation exchange capacity). CEC mäts genom att summera mängden negativt laddade joner på partikelytorna i ett prov. Enligt Eriksson et al. (2011) är CEC korrelerat till pH då mängden variabla negativa laddningar blir större ju mer pH höjs. Katjonutbyteskapaciteten i en sur jord begränsas av att en del av de variabla negativa laddningsställena är oupplösta.

### *Basmätnadsgrad*

”Basmätnadsgraden (BS) är kvoten mellan summan av utbytbara baskatjoner och CEC uttryckt i procent” (Eriksson et al., s. 156, 2011).

Kalciumjonen ( $\text{Ca}^{2+}$ ) är ett exempel på en baskatjon. Den är neutral ur ett syra/bas-perspektiv, men kallas ändå för baskatjon på grund av att det generellt brukar råda mer alkaliska (basiska) förhållanden vid en högre förekomst av denna typen av joner i marken. För att komma fram till basmätnadsgraden i en lösning delas den totala mängden utbytbara baskatjoner med den totala mängden utbytbara katjoner (CEC = cation exchange capacity). Den delen av CEC som inte utgörs av baskatjoner består av sura katjoner, som t.ex. vätejoner ( $\text{H}^+$ ) och aluminiumjoner ( $\text{Al}^{3+}$ ). Basmätnadsgraden i marken korrelerar enligt detta till pH i lösningen. En låg basmätnadsgrad innebär en högre mängd sura katjoner, vilket också innebär surare förhållanden och ett lägre pH (Eriksson et al., 2011).

## Allmänt om kemiska processer i marken vid kalkning

Vid tillförsel av kalk sker ett flertal kemiska processer i marken. Det första som sker är att kalciumprodukten (t.ex. kalciumkarbonat,  $\text{CaCO}_3$ ) löses upp av markfukten. När upplösningen påbörjats inleds de kemiska processerna, vilka i huvudsak handlar om katjonutbyten mellan  $\text{Ca}^{2+}$  (kalcium)- och  $\text{H}^+$  (väte) joner, men också mellan  $\text{Ca}^{2+}$ - och  $\text{Al}^{3+}$  (aluminium) joner. Precis hur reaktionerna går till skiljer sig något från fall till fall, och beror bland annat på faktorer som vilken pH, basmätnadsgrad och katjonutbyteskapacitet som råder i marken, samt vilken typ av kalk som tillförs (Eriksson et al., 2011).

Vid en så kallad grundkalkning, då man tillför kalk (t.ex. kalciumkarbonat) för att höja pH från surt till neutralt, sker den kemiska reaktionen enligt nedanstående formel (Eriksson et al., 2011).



## Kemiska reaktioner i marken vid tillförsel av bränd eller släckt kalk

Bränd och släckt kalk är som tidigare nämnt mer lösligt och snabbverkande än det kolsyrabundna kalciumet som finns i kalkstensmjöl. Kalcium bundet i form av oxid eller hydroxid har till skillnad från kalciumkarbonat ett innehåll av så kallad fri kalk, se tabell 1. Fri kalk kan enligt Berglund (1971) hastigt frigöra stora mängder kalciumjoner ( $\text{Ca}^{2+}$ ). Det hastiga frigörandet av kalciumjoner gör att de kemiska reaktionerna också går fort. pH-värdet i marken kan höjas mycket snabbt, uppåt pH 11, för att sedan återgå till mer neutrala nivåer. Denna egenskap ligger bakom de strukturförbättrande och stabiliserande effekterna som kan åstadkommas genom tillförsel av bränd eller släckt kalk (Eriksson et al., 2011).

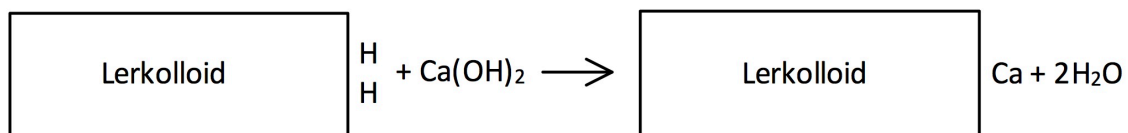
De reaktioner som sker vid tillförsel av bränd eller släckt kalk skiljer sig alltså från de som sker vid tillförsel kalkstensmjöl (kalciumkarbonat). De reaktioner som påverkar markens fysikaliska egenskaper kan delas in i tre delar (Berglund, 1971):

1. Basutbyte
2. Puzzolanreaktion
3. Murbruksbildning

### *Basutbyte*

Det är i den första reaktionen som utbyten av katjoner sker. De sura katjoner som sitter på lerkolloiderna i marken släpper sina platser och rör sig ut i markvätskan där de byter plats med baskatjoner, i detta fall kalciumjoner. Till lerkolloiderna binds sedan kalciumjonerna, se figur 1. I denna reaktion förändras laddningarna på lerkolloiderna, vilket möjliggör så kallade bryggbindningar mellan kolloider, och bidrar till att flera kolloider ansluter sig till varandra. En del av det vatten som legat mellan kolloiderna låses i denna process, vilket gör att det i praktiken kan upplevas som att jorden blir torrare, fast den i själva verket fortfarande håller samma mängd vätska (Berglund, 1971).

Basutbytesreaktionens hastighet hänger till stor del på hur mycket markvätska som finns tillgängligt. Vid normalfuktiga förhållanden sker denna reaktion i princip omedelbart, medan den under torrare förhållanden kan ta betydligt längre tid (Berglund, 1971).



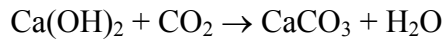
**Figur 1.** Basutbytesreaktion i en lerjord som tillförts kalciumhydroxid (efter Berglund, 1971).

### Puzzolanreaktion

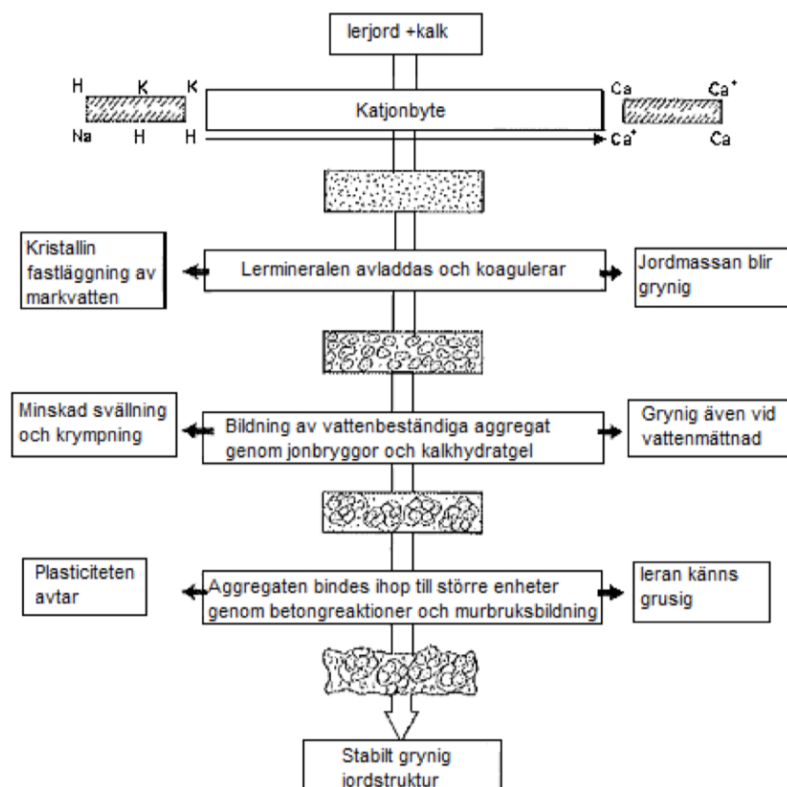
De bindningar som i basutbytesreaktionen har bildats mellan lerkolloiderna stärks ytterligare i puzzolanreaktionen. Reaktionen går till så att kalciumjonerna reagerar med aluminium- och kiselföreningar och bildar kalciumaluminathydrater samt kalciumsilikathydrater (Berglund, 1971). Dessa föreningar bildar kittsubstanser som stärker de bindningar som bildades i basutbytesreaktionen, vilket gör denna reaktion viktig i sammanhanget för aggregatstabilisering och strukturförbättring (Eriksson et al., 2011). För att denna reaktion ska kunna ske krävs förutom aluminium- och kiselföreningar även tillgång på fri kalk (Berglund, 1971).

### Murbruksbildning

I denna reaktion bildas kalciumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) mellan lerkolloiderna, vilket ytterligare bidrar till att stärka bindningar och öka volymen på de aggregat som bildas. Reaktionen sker enligt nedanstående formel (Berglund, 1971).



Den markstrukturförbättrande process som de tre ovan beskrivna reaktionerna ingår i illustreras i figur 2.

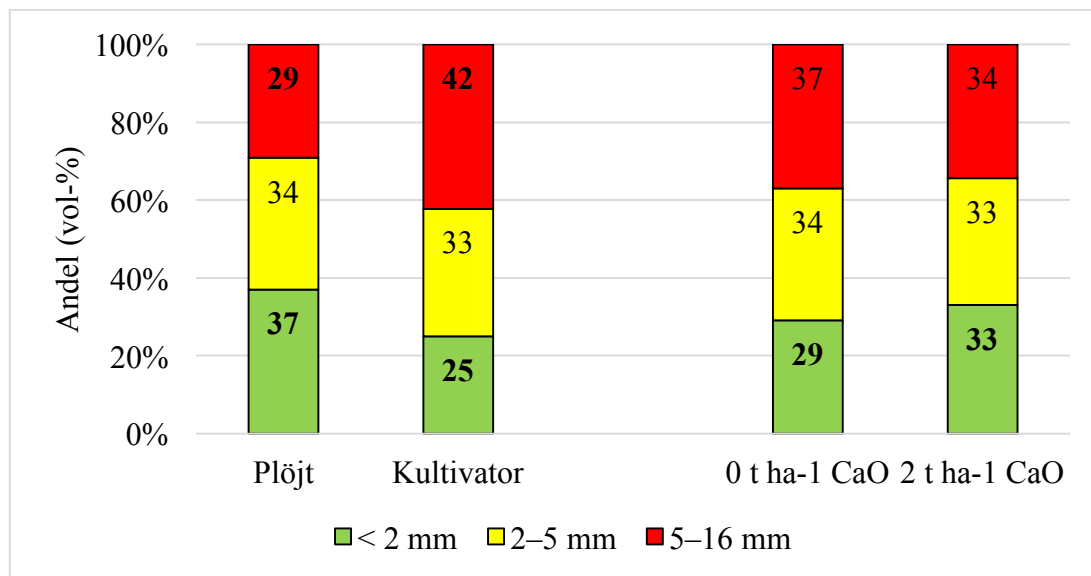


**Figur 2.** Illustration över hur kalken genom olika reaktioner förbättrar och stabiliserar markstrukturen (efter Berglund, 1971).

## Resultat från tidigare försök med strukturkalkning

Det genomfördes under åren 2010–2014 en svensk studie om strukturkalkning på lerjordar. Försöken genomfördes söder om Uppsala på jordar med lerhalter mellan 22,5 och 40 %, dvs. lättleror och mellanleror. Den huvudsakliga målsättningen var att kartlägga strukturkalkens effekt på aggregatstabilitet, aggregatsstorleksfördelning i vårbruket (i samband med sådd) och skördeutfall. Detta undersöktes genom att jämföra tre olika kalkbehandlingar i stigande givor i tre försök. De två kalkprodukter som jämfördes utöver det obehandlade A-ledet var släckt kalk ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) och blandprodukten Nordkalk Aktiv Struktur, vilken är en blandning av släckt kalk och kalkstensmjöl ( $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CaCO}_3$ ). I ett fjärde försök undersöktes kombinationen av grund bearbetning (höstplöjt eller stubbearbetat) med och utan släckt kalk (Blomquist et al., 2017a).

Resultaten i studien visade att leden som behandlats med högre givor (>6 ton CaO per ha) av både släckt kalk och blandprodukten Nordkalk Aktiv Struktur hade signifikant lägre turbiditet (grumlighet) jämfört med det obehandlade ledet. En lägre turbiditet indikerar en högre aggregatstabilitet och därmed lägre risk för partikulära fosforförluster från leraggregatens ytor. För de lägre givorna var skillnaderna i turbiditet inte statistiskt signifikanta. Några signifikanta skillnader för aggregatstorleksfördelning kunde endast konstateras i försöket med kombination av jordbearbetning och tillförsel av släckt kalk. Resultatet visade där att det fanns signifikanta skillnader inom den minsta (<2 mm) aggregatstorlekskategorin. De led som behandlats med kalciumhydroxid och höstplöjts istället för att stubbearbetats hade högst procentuella innehåll av den minsta fraktionen, dvs. högst innehåll av fin jord. De led som höstplöjts hade dessutom ett statistiskt signifikant lägre innehåll av grova aggregat (5–16 mm) än de led som stubbearbetats, se figur 3 (Blomquist et al., 2017a).



**Figur 3.** Aggregatstorleksfördelning i ett av fältförsöken där resultaten visade på statistiskt signifikanta skillnader ( $p < 0,05$ ). Det råder signifikanta skillnader mellan de värden som i storlekskategorierna <2 mm och 5–16 mm är markerade i fetstil. Staplarna t.v. i figuren avser led för jämförelse av olika jordbearbetning, och staplarna t.h. avser led för kalkbehandling (efter Blomquist et al., 2017a).

Att kalkning kan minska lerjordars utlakningsförluster av fosfor var något som påvisades av Eslamian et al. (2018) i ett kanadensiskt försök. I en labbstudie blev jordprover med 40 % lerhalt tillförda kalkprodukter av olika typ och mängd. De kalkprodukter som tillfördes innehöll bl.a. kalciumhydroxid eller kalciumoxid. Efter regnsimulering över jordproverna mättes fosforförluster genom bl.a. utlakning och ytavrinning. Resultaten visade att alla kalkprodukter hade en förmåga att minska utlakningen av helt upplöst (ej partikulärt bunden) fosfor. Vilken mängd som ansågs vara optimal vid tillförsel av de olika kalkprodukterna varierade dock, men låg för de flesta mellan 1–2 % av vikten för den jord som skulle behandlas (Eslamian et al., 2018).

I en studie genomförd av Kindvall (1999) undersöktes olika kalkprodukters inverkan på bland annat aggregatstorleksfördelning. Försöket genomfördes på mellanlera och styv lera, och behandlingarna var bland annat; kalkstensmjöl (2 ton CaO per ha), släckt kalk liten giva (2,1 ton CaO per ha) och släckt kalk stor giva (6 ton CaO per ha). Lerhalterna på de fyra försöksplatserna var alla olika och låg mellan 24 och 48 % ler. Kindvall kom i sin studie fram till att kalkningens inverkan på aggregatstorleksfördelningen inte kunde säkerställas med statistisk signifikans.

En annan studie som behandlat frågan om strukturkalkningens inverkan på markfysikaliska egenskaper genomfördes av Blackert (1996). Studien genomfördes på två olika försöksplatser i Västmanland, den ena en styv lerjord med 56 % lerhalt och den andra en mellanlera med 38 % lerhalt. Dessa var flerfaktoriella försök som utöver kalkning också analyserade effekterna av olika system för jordbearbetning och gödsling. Kalkförsöken lades upp i två led; ett behandlat med strukturkalk och ett obehandlat. På den styva lerjorden tillfördes det behandlade ledet 9,5 ton CaO per hektar, och mellanleran tillfördes en lägre giva om 6,5 ton CaO per hektar. För att analysera aggregatstorleksfördelningen genomfördes provtagningar i såbädden enligt den metod som beskrevs av Kritz (1983). Blackert kom i sin studie fram till att det fanns tydliga skillnader i aggregatstorleksfördelning i såbädden mellan de två leden. Den kalkade jorden hade ett högre innehåll av aggregat i kategorierna <2 mm och 2–5 mm än vad den obehandlade jorden hade. Den obehandlade jorden hade ett högre innehåll av grova aggregat med medeldiameter >5 mm (Blackert, 1996).

### **Strukturkalkning i praktiken**

Kalcium i form av oxid eller hydroxid verkar stabiliserande på jordens lerpartiklar, och bidrar inte själv till att luckra och förbättra strukturen. Det krävs därför att jorden redan är i god hävd, med fungerande dränering och fin struktur, när strukturkalken sprids och brukas ner (Berglund & Blomquist, 2015).

Strukturkalk bör spridas under sensommaren, lämpligen efter skörd av någon strukturförbättrande gröda, som till exempel höstraps eller vall. Jorden bör vara så torr att den reder sig. Vid för blöta förhållanden riskerar effekten att utebli helt. Man bör bruka ner kalken snarast efter spridning och sträva efter att nå en god kontaktverkan mellan kalken och lermineralet i marken. Detta åstadkoms genom att bruka in kalken med ett efter förhållandena lämpligt redskap, till exempel en kultivator. Rekommendationen är att med minst två överfarter i olika riktning bruka ner kalken till det djup som jorden normalt brukas, vanligtvis ca 15–25 cm (Berglund & Blomquist, 2015).



## MATERIAL OCH METOD

### Försöksupplägg

Försöket genomfördes på sex försöksplatser runt om i Skåne, se tabell 2. Dessa har ingått i ett större försök som genomförs av Hushållningssällskapet. Denna studie är således enbart en mindre del av ett större projekt som behandlar frågan om kalkning och strukturralkning, och de olika insatsernas inverkan på bland annat markstruktur, växtnäring, växtskydd och ekonomi (Hushållningssällskapet, u.å.).

**Tabell 2.** Förteckning över de försöksplatser som ingått i denna studie, textur för jorden på dessa (Olsson, u.å.a.), samt tidpunkter för sådd/sättning och provtagning våren 2018 (Hushållningssällskapet, 2017)

Plats/Ort	Västraby Gård Kattarp	Ekeberg Kristianstad	Gislöv Simrishamn	Vadensjö Landskrona	Vallby Klagstorp	Hörtegården Skivarp
Jordart	mmh ML	mmh moLL	mmh ML	nmh moLL	mmh moLL	mmh moLL
Lerhalt	25 %	21 %	27 %	21 %	19 %	19 %
Mullhalt	3,1 %	4,1 %	5,5 %	2,8 %	3,5 %	2,1 %
Gröda	Vårkorn	Vårkorn	Vårkorn	Vårkorn	Vårkorn	Potatis
Datum för sådd/sättning	7/4 2017	8/4 2017	23/4 2017	22/4 2017	28/4 2017	16/5 2017
Datum för provtagning	8/4 2017	9/4 2017	23/4 2017	23/4 2017	5/5 2017	18/5 2017
Nederbörd mellan sådd/ provtagning	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	13 mm	0 mm

### ***Kalkbehandling och nedbrukning***

Försöken var upplagda som blockförsök med tre olika behandlingsled, vilka upprepades i tre block. Kalkbehandlingarna utfördes på samtliga platser hösten 2015. De tre leden behandlades enligt nedanstående:

Led K1 – Obehandlat

Led K2 – Kalkstensmjöl, 4 ton CaO per hektar

Led K3 – Strukturkalk (Nordkalk Aktiv struktur), 4 ton CaO per hektar

Nedbrukningen genomfördes i anslutning till spridning, se tabell 3.

***Tabell 3. Information om spridning och nedbrukning av kalk hösten 2015 på de försöksplatser som ingått i denna studie (Olsson, u.å.)***

Plats	Västraby Gård	Ekeberg	Gislöv	Vadensjö	Vallby	Hörtegården
Datum för kalkspridning	28/9 2015	30/9 2015	29/9 2015	28/9 2015	29/9 2015	29/9 2015
1: a överfart: Tidpunkt Redskap Bearb. djup	28/9 2015 Tallriks- redskap 7 cm	1/10 2015 Väderstad SK 20 15 cm	29/9 2015 Wilrich Kultivator 10 cm	28/9 2015 Kultivering Cultus ~15 cm	29/9 2015 Kongskilde Vibroflex 5 cm	29/9 2015 Väderstad Carrier XL 15 cm
2: a överfart: Tidpunkt Redskap Bearb. djup	28/9 2015 Tallriks- redskap 8 cm	1/10 2015 Väderstad SK 20 15 cm	30/9 2015 Wilrich Kultivator 15 cm	1/10 2015 Kultivering Cultus ~ 15 cm	29/9 2015 Kongskilde Vibroflex 10 cm	29/9 2015 Väderstad Carrier XL 15 cm
3: e överfart: Tidpunkt Redskap Bearb. djup	30/9 2015 Kultivator 18 cm	3/10 2015 Såbäddsharv Väderstad 7,5 cm	30/9 2015 Wilrich Kultivator 15 cm	3/10 2015 Kultivering Cultus ~ 20 cm	29/9 2015 Kongskilde Vibroflex 15 cm	-
Markfukt/ kommentar från försöksvärd	Torrt	”Lagom”	Viss fukt	Hög fukta	Torrt	”Lagom”
Resultat/ kommentar från försöksvärd	Väl inarbetat	Mycket fint bruk	Mycket fin struktur	Svår inblandning	Fin struktur	Mycket bra inblandning
Ytterligare bearbetning efter kalknedbrukning hösten 2015	Plöjning 22 cm	Plöjning 23 cm	Plöjning 22 cm	-	Plöjning 18 cm	Plöjning 22 cm

### ***Jordbearbetning och sådd före provtagning***

Den jordbearbetning som utfördes i försöken våren 2017 anpassades till de lokala förutsättningarna och utfördes enligt de metoder som de enskilda lantbrukarna normalt tillämpar i sin egen växtodling. Metoden för såbäddsberedning skilje sig därför mellan platserna, se tabell 4. All jordbearbetning på varje försöksplats har dock varit utförd på samma sätt inom de tre behandlingsleden, dvs. med samma typ av redskap, med samma antal överfarter och med samma bearbetningsdjup. Det var en grundläggande faktor för att effekterna av kalkningen skulle kunna studeras och för att resultaten skulle vara trovärdiga.

**Tabell 4.** Utförd jordbearbetning knutet till odlingssäsongen 2017 på de i studien ingående försöksplatserna (Hushållningssällskapet, 2017)

Plats	Västraby Gård	Ekeberg	Gislöv	Vadensjö	Vallby	Hörtegården
Hösten 2016: Bearbetning Tidpunkt Djup	Plöjning oktober 20 cm	Plöjning - 23 cm	Plöjning december 20 cm	Kultivering - 15 cm	Plöjning november 18 cm	Plöjning november 20 cm
Våren 2017: 1: a överfart Tidpunkt Redskap Djup	5/4 2017 Harvning 4 cm	- Harvning 3,5 cm	April 2017 Harvning 3,5 cm	April 2017 Harvning 4 cm	9/4 2017 Harvning 4 cm	15/5 2017 Carrier 15 cm
2: a överfart Tidpunkt Redskap Djup	6/4 2017 Harvning 4 cm	-	April 2017 Harvning 3,5 cm	-	9/4 2017 Harvning 4 cm	15/5 2017 Stensträng- läggning
3: e överfart Tidpunkt Redskap Djup	-	-	-	-	10/4 2017 Harvning 4 cm	-

Hushållningssällskapet genomförde även ett gödslingsförsök med fem olika gödslingsled inom de tre kalkningsleden som ett så kallat split-plot-försök våren 2017, på de platser som denna studie utfördes på. För att inte riskera osäkra resultat i undersökningen av strukturkalkens effekter bestämdes därför att uttagningen av proverna till denna studie skulle genomföras i ett och samma gödslingsled, *G1*, på samtliga platser. I gödslingsled *G1* radmyllades gödselprodukten *Yara Axan NS 27-4* i samband med sådd av vårkorn. Mängden som tillfördes varierade dock mellan de olika platserna. Detta gäller för samtliga försök sådda med vårkorn. I försöket på Hörtegården, där det odlades potatis, fanns inget gödslingsförsök vilket gjorde att ingen särskild hänsyn behövde tas till detta.

## Metod för aggregatstorlekskategorisering i såbädden

Provtagningen och den praktiska undersökningen av såbädden genomfördes i tidsfönstret mellan sådd/sättning av vårkorn/potatis och den första efterföljande nederbörden. Målsättningen var att genomföra provtagningen före regn då det skulle kunna påverka såbäddens fysiska uppbyggnad och utseende, vilket hade gjort värdena från provtagningen mindre trovärdiga.

Storlekskategoriseringen av aggregaten i såbädden genomfördes enligt en metod framtagen av Göran Kritz (1983) och krävde tillgång till särskild utrustning, se figur 4. Metoden inleds med att en särskild ram placeras i jorden, och trycks ner i den luckra såbädden tills den går mot bearbetningsbotten. Volymen jord som samlas inom ramen varierar därför beroende på hur djupt såbädden har bearbetats. Vilken den totala volymen jord blir är inte av betydelse i sammanhanget, då resultaten av respektive storlekskategori räknas om till volymprocent av det totala provet innan de bearbetas statistiskt. Ramens huvudsakliga funktion är att sätta upp fasta mått i horisontell ledd för att säkerställa att det inte rasar jord från kanterna. Provtagaren riskerar tack vare detta inte att samla upp för mycket jord ur det övre skiktet av såbädden (där det vanligtvis ligger mer aggregat av grövre fraktion, än vad det gör längre ned). Ur ramen skopar provtagaren upp jord med en särskilt avsedd skopa. Detta görs ända ner till såbäddens bearbetade botten, och den sista finjorden som ligger kvar mot den något kuperade botten borstas upp i skopan med en mindre borste.

Den jord som skopats upp placeras på det övre av de två sållen för att sedan sållas till tre olika fraktioner. Hålen i det övre sållet har en medeldiameter om 5 mm, och i det underliggande sållet har hålen en diameter om 2 mm. Vid sållning av jorden får man därmed fram tre olika storlekskategorier;  $>5$  mm, 2–5 mm och  $<2$  mm, se figur 5.

Volymen av respektive storlek mäts sedan upp i ett lämpligt litermått, med en noggrannhet om en halv deciliter. Den totala volymen av de tre aggregatstorlekarna summeras och ger svar på hur stor volym det totala jordprovet var. Då den totala volymen av varje jordprov varierar mellan de olika platserna räknas volymen av respektive storlek om till volymprocent, dvs. hur stor procentuell andel den enskilda aggregatsstorleken utgör av den totala provvolymen. Denna beräkning gör resultaten från de olika provtagningarna/sållningarna jämförbara med varandra.

Vid aggregatstorlekskategorisering av det försök som det satts potatis i gällde samma metod med ett mindre undantag. Fältet var djupt bearbetat och kuporna innehöll så pass stor mängd jord att det ansågs orimligt att sålla jorden ända ner till bearbetningsbotten. Metoden anpassades därför till att sållningen skulle omfatta en fylld provtagningsskopa. Skopans övre kant lades i linje med kupans övre skikt och fördes sedan in i kupan i horisontell ledd. Detta gav en skopa fylld med material som sedan sållades enligt samma metod som tidigare beskrivits.

Försöken var som tidigare nämnt upplagda som blockförsök med tre block, vilket innebär att samtliga behandlingsled upprepades i tre block inom varje försöksplats. I varje försöksparcell gjordes två provtagningar, vilka sedan låg till grund för ett medelvärde för varje parcell. Det innebär att det på varje försöksplats gjordes sex provtagningar per varje behandlingsled (två provtagningar per parcell upprepat i tre block).



**Figur 4.** Utrustning för provtagning. Foto: Hjalmar Tindberg (2017).



**Figur 5.** De tre aggregatstorlekkategorierna. Från höger:  $>5$  mm, 2–5 mm,  $<2$  mm. Foto: Hjalmar Tindberg (2017).

## Metod för mätning av turbiditet

Jag har själv inte genomfört mätningarna av turbiditet, utan har av Jens Blomquist blivit delgiven resultaten av dessa. En beskrivning av metoden för dessa mätningar följer nedan.

Prover till turbiditetsmätningarna togs ur storlekskategorin 2–5 mm ut i samband med aggregatstorlekskategoriseringen. Dessa samlades in från varje försöksparcell för att representera samtliga försöksplatser i denna studie. Det innebär att totalt 54 jordprov ingick i mätningarna av turbiditet.

Målsättningen med dessa mätningar var att analysera vilken stabiliserande effekt kalkningen haft på aggregaten i jorden. Detta kan analyseras genom att mäta mängden av de partikulära förluster som jorden har i samband med nederbörd, dvs. hur mycket jordpartiklar som försvinner ut i det vatten som dräneras genom jorden. Metoden gick ut på att genom regnsimulationer utsätta jordproverna för nederbörd och sedan samla det vatten som dräneras ur jordprovet, för att slutligen studera skillnaderna i turbiditet, vilket är ett mått på vattnets grumlighet. En högre grumlighet indikerar om högre förluster av jordpartiklar (Blomquist, 2017b).

Aggregaten i jordprovet utsattes för nederbörd (regnsimulering) två gånger med ett dygns mellanrum. Det vatten som dränerades ur provet samlades upp för analys av turbiditet och elektrisk konduktivitet (EC). Det senare mättes för att kontrollera att jordprovet representerade rätt behandlingsled. EC höjs vid tillförsel av kalciumprodukter, vilket gör att man kan se om ett jordprov representerar en kalkad jord eller inte, och blir därmed en fungerande mätare för detta ändamål (Blomquist, 2017b).

Efter att turbiditeten mätts en första gång placerades vattenprovet i en skakapparat som kördes i 10 min. Därefter ställdes provet för att sedimentera i 4,5 timmar, inför en andra provtagning där ett sedimentprov togs vid ett djup om 5,6 cm. Det senare provet var också en turbiditetsmätning och syftade till att mäta vattnets innehåll av lerpartiklar. Då turbiditeten mättes två gånger per bevattningstillfälle resulterade detta i totalt fyra mätningar per jordprov (Blomquist, 2017b).

Turbiditeten mäts genom att ljusstrålar skickas genom vattenprovet. Genom att analysera hur ljusstrålarnas riktning påverkas vid passage genom vattnet erhålles ett svar om hur mycket partiklar som finns i vattnet, dvs. hur grumligt det är (Sonesten, 2017).

## Statistisk analys

Den statistiska bearbetningen har genomförts i programmen Microsoft Excel samt Minitab. Analyserna har skett utifrån signifikansnivån 5 %, vilket innebär att statistisk signifikans förelåg om  $p < 0,05$ . Som tidigare nämnt beräknades värdena från aggregatstorlekskategoriseringen om till volymprocent av den totala provvolymen innan de jämfördes med varandra. Dessa värden analyserades genom variansanalyser (ANOVA), en för varje storlekskategori. Dessa analyser hade två faktorer (variationsursprung); den ena var plats + block, och den andra var led (behandling).

Variansanalysen gav svar på om någon/några signifikanta skillnader förekom. För att få svar på mellan vilka platser eller led som de eventuellt signifikanta skillnaderna förekom genomfördes Tukey's test.

Resultaten från mätningarna av turbiditet bearbetades och analyserades i Minitab. Precis som för aggregatstorleksfördelningen så användes även variansanalys (ANOVA) och Tukey's test för att kartlägga de eventuellt signifikanta skillnaderna. Signifikansnivån i analyserna var 5 %.

Den statistiska analysen av turbiditet avgränsades i denna studie till att fokusera på resultaten i den fjärde, och sista mätningen av turbiditet. Det är den mätning som görs när jordprovet har utsatts för två regnsimulationer samt skakats och sedimenterat. Anledningen till att dessa mätresultat används är att resultaten då representerar turbiditet i dräneringsvatten från den jord som blivit mest bearbetad, dvs. fått störst mängd simulerad nederbörd över sig. Den mätningen har i denna studie kallats för TURB 22.



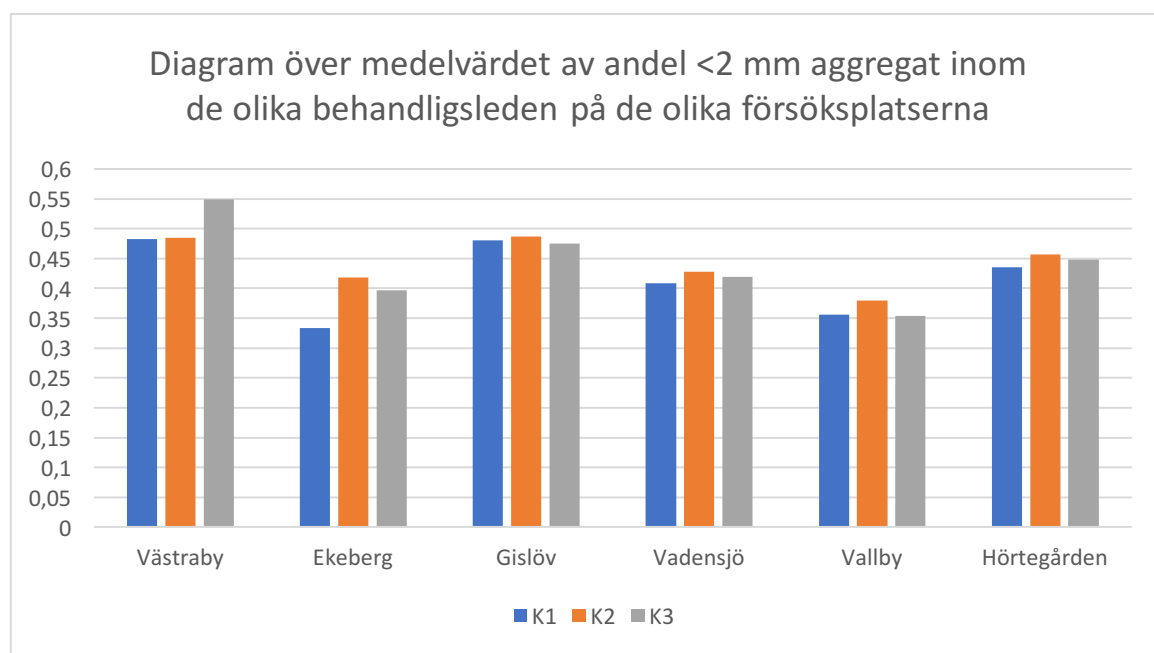
## RESULTAT

### Aggregatstorleksfördelning

Variansanalyserna för aggregatstorleksfördelningen visade att det för samtliga tre storlekskategorier fanns statistiskt signifikanta skillnader ( $p = <0,05$ ) i resultaten för faktor ”plats + block”. Det innebär att det råder signifikanta skillnader mellan värdena från de olika försöksplatserna. Resultat för faktor ”led” (behandling) för respektive kategori framgår under rubrikerna nedan.

#### Aggregat <2 mm

Den statistiska analysen av aggregatstorlekskategorin <2 mm visade att det fanns tendens till skillnader mellan behandlingsleden ( $p = 0,069$ ), se bilaga 1 (figur 11). Det framgick genom Tukey's test att proverna i det obehandlade ledet K1 i snitt innehöll 41,6 % aggregat av storleken <2 mm, vilket var det lägsta värdet. Led K2 (kalkstensmjöl) hade det högsta innehållet med ett värde på 44,2 %, följt av det strukturralkade ledet K3 som innehöll om 44 % aggregat <2 mm. De två behandlade leden tenderade att innehålla en större mängd finjord än det obehandlade ledet. Dessa siffror representerar dock ett snitt, och det förekom variationer i resultat mellan de olika platserna, se figur 6.



**Figur 6.** Diagram över medelvärden av de volymprocentuella andelarna <2 mm aggregat på de olika försöksplatserna. Varje stapel representerar ett medelvärde av totalt sex provtagningar.



### ***Aggregat 2–5 mm***

Resultatet av variansanalysen gav p-värdet 0,498. Det fanns alltså i denna storlekskategori inga statistiskt signifikanta skillnader mellan leden för behandling, se bilaga 1 (figur 12).

### ***Aggregat >5 mm***

Denna storlekskategori representerar de största aggregaten med medeldiameter från 5 mm och uppåt. Variansanalysen gav p-värdet 0,016, vilket innebär att det fanns statistiskt signifikanta skillnader mellan två eller flera av behandlingsleden, se bilaga 1 (figur 13). Genom att jämföra resultaten från respektive led i Tukey's test erhöles svar på mellan vilka led skillnaden förekom, se figur 7. Resultatet av detta visade att den signifikanta skillnaden gällde mellan leden K1 (obehandlat) och K2 (kalkstensmjöl). Värdet för led K3 (strukturkalk) låg mellan de två andra leden, men skilde sig inte tillräckligt från något av dem för att uppnå statistisk signifikans.

Resultatet visade att mängden aggregat i storleken >5 mm i snitt motsvarade 37,9 % av den totala provvolymen i led K1. Proven i det strukturkalkade ledet K3 bestod i snitt av 35,4 % aggregat i denna storlek, medan proven i led K2 hade lägst innehåll av denna storlek, med ett värde av 34,7 %. Det obehandlade ledet hade därmed det största innehållet av aggregat i den grövsta storlekskategorin. Värdena för de volymprocentuella andelarna är medelvärden för de olika försöksplatserna, och döljer de mer platsspecifika variationerna. Dessa tydliggörs dock genom figur 8.

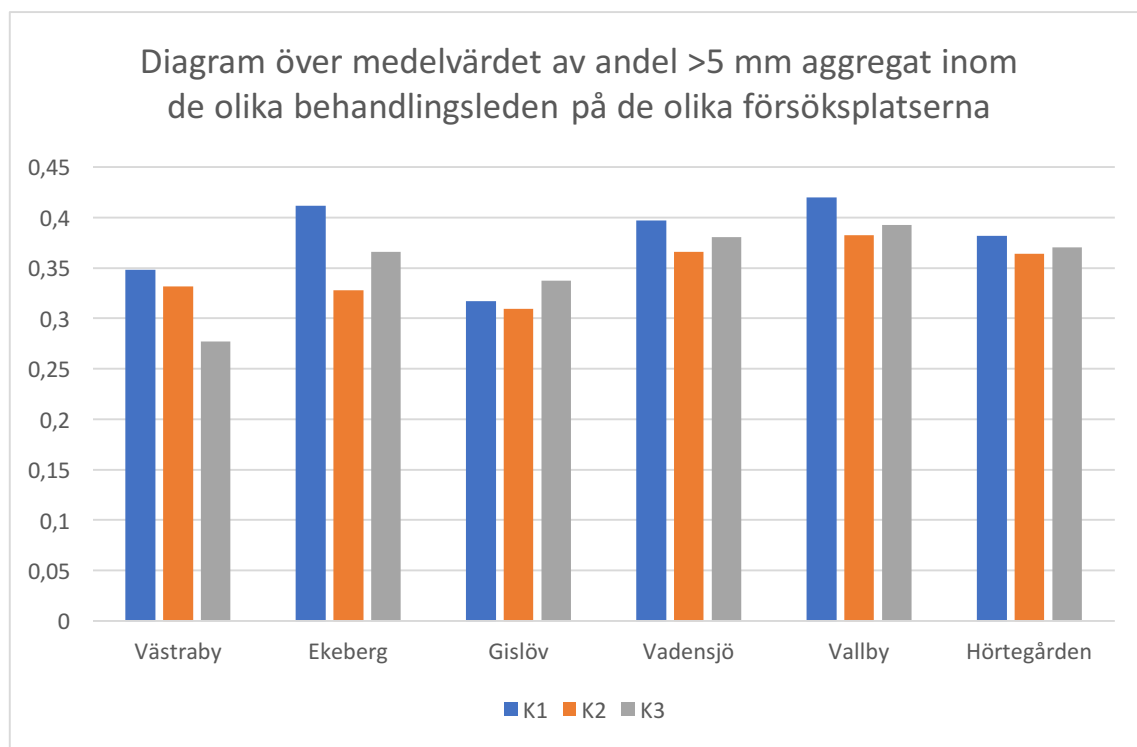
## **Tukey Pairwise Comparisons: Led**

### **Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence**

Led	N	Mean	Grouping	
K1	18	0,379296	A	
K3	18	0,353925	A	B
K2	18	0,346891		B

*Means that do not share a letter are significantly different.*

**Figur 7.** Tukey's test för de tre behandlingsleden i storlekskategorin >5 mm.



**Figur 8.** Diagram över medelvärden av de volymprocentuella andelarna >5 mm aggregat på de olika försöksplatserna. Varje stapel representerar ett medelvärde av totalt sex provtagningar.

### Aggregatstabilitet

Variansanalysen på värdena från den fjärde turbiditetsmätningen (TURB 22) gav p-värdet 0,000 för variationsursprungsfaktorn behandling (led), vilket innebär att statistiskt signifikanta skillnader förekom mellan ett eller flera av leden, se bilaga 1 (figur 14). Jämförelsen av dessa resultat i Tukey's test visade att led K2 (kalkstensmjöl) och K3 (strukturkalk) signifikant skiljer sig från det obehandlade ledet K1, se figur 9. Den jord som behandlats med kalkstensmjöl (K2) hade det lägsta medelvärdet i mätningarna, och var således den jord som hade lägst risk för partikulära fosforförluster vid nederbörd. Den strukturkalkade jorden hade ett något högre värde, men tillräckligt lågt för att med signifikans skilja sig från den obehandlade jorden, som låg avsevärt högre i värde. Mätvärdena skiljde sig något från varandra på de olika platserna, se figur 10. Det obehandlade ledet (K1) hade det högsta värdet på varje plats. Turbiditeten i led K2 och K3 låg nära varandra på alla platser utom Hörtegården, där led K2 tydligt hade lägst turbiditet.

## Comparisons for TURB 22

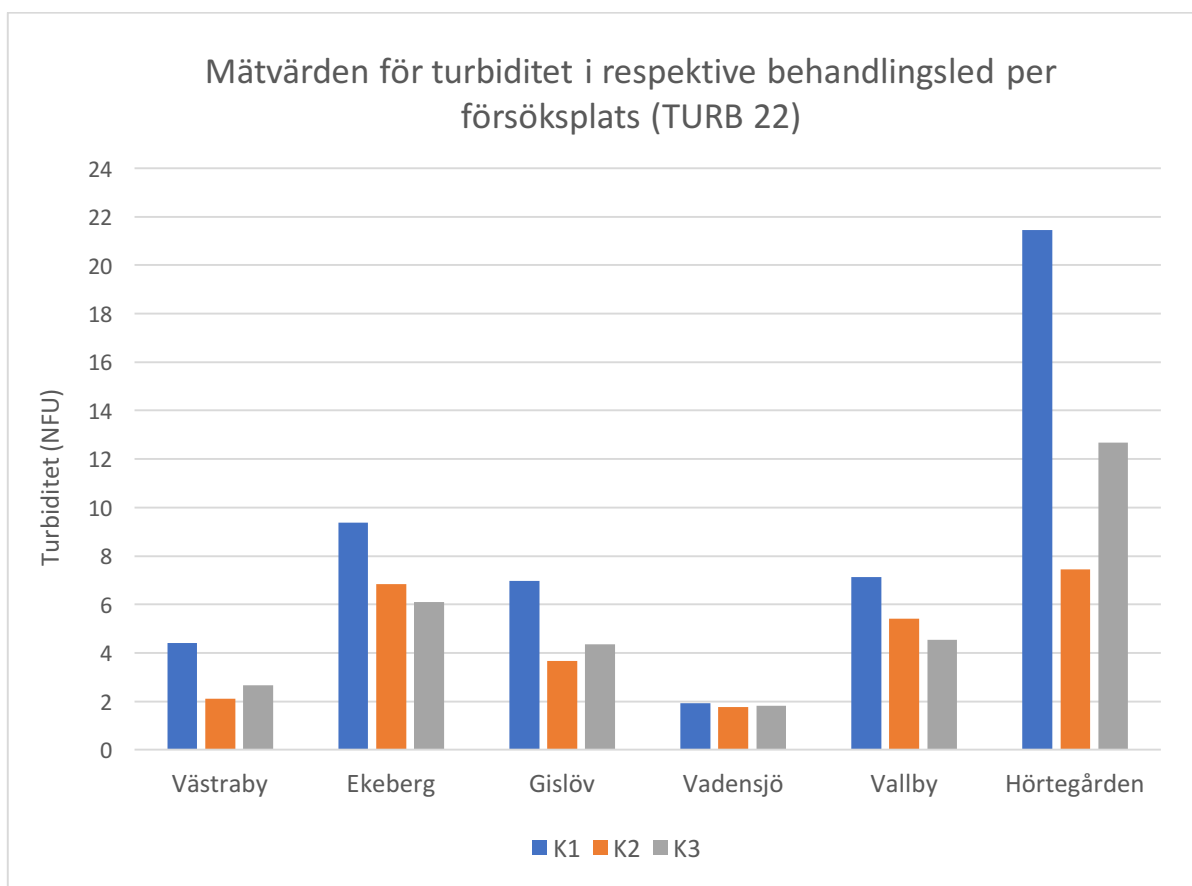
### Tukey Pairwise Comparisons: Response = TURB 22, Term = TREATM

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

TREATM	N	Mean	Grouping
1	18	7,40722	A
3	18	4,85111	B
2	17	3,72583	B

Means that do not share a letter are significantly different.

**Figur 9.** Tukey's test för jämförelse av de tre behandlingsleden och deras effekt på mätningen TURB 22.



**Figur 10.** Snittvärden för turbiditet inom de olika behandlingsleden på de olika försöksplatserna. Mätvärdena är angivna i enheten NFU (Nephelometric Formazine Unit) och kommer från den fjärde turbiditetsmätningen (TURB 22).

## DISKUSSION

### Aggregatstorleksfördelning

Resultaten visade på signifikant skillnad i innehåll av aggregat  $>5$  mm mellan det led som behandlats med kalkstensmjöl (K2) och det obehandlade ledet (K1). Led K2 hade det lägsta innehållet av grova aggregat, vilket ger indikationer om en hög brukbarhet för aggregaten i den övre matjorden. Resultatet från det strukturstabiliserade ledet (K3) visade på värden mellan de två andra leden, och trots att det inte skiljde sig signifikant från något av de andra leden så indikerade värdena på att behandlingen hade positiv effekt. Dessa är intressanta resultat då strukturstabilisering antas ha bättre effekt på struktur och brukbarhet i jorden än kalkstensmjöl. Intressant är också att de båda kalkbehandlingarna tenderade att innehålla mer finjord (aggregat  $<2$  mm) än den obehandlade jorden ( $p = 0,069$ ).

I litteraturstudien framgick det att produkter innehållande bränd eller släckt kalk i regel har god effekt på markstruktur, brukbarhet och aggregatstabilitet, och att kalkstensmjöl inte förutsätts ha samma effekt. Försöken i denna studie visade dock resultat som talar mot detta. Att effekten av strukturstabilisering varierar mellan de olika platserna kan bero på ett flertal orsaker. Markförhållanden och metod för spridning och nedbrukning av strukturstabiliseringen är två starkt avgörande faktorer, och lerhalt i jorden en annan.

En särskilt intressant aspekt av resultaten är att kalkstensmjöl hade så god effekt på aggregatstorleksfördelningen. En teori bakom detta är att behandling med kalkstensmjöl rimligen bör utlösa en del reaktioner som verkar stabiliserande. Ett exempel på en sådan reaktion är basutbytet, där bland annat kalcium- och vätejoner byter plats med varandra. Detta är som tidigare nämnt en inledande reaktion i den strukturstabiliserande processen, och bör rimligen inte ge den fullt stabiliserande effekten som annars kan åstadkommas genom tillförsel av bränd eller släckt kalk.

Blackert (1996) kom i sin studie fram till att släckt kalk hade positiv inverkan på aggregatstorleksfördelningen. Resultatet av hans studie visade att den jord som behandlats med släckt kalk innehöll en större mängd finjord än den obehandlade jorden. I den studie som Kindvall (1999) genomförde såg resultaten annorlunda ut. Det gick i den studien inte att se några generella effekter av varken strukturstabilisering eller kalkstensmjöl.

Resultaten ur dessa båda studier är intressanta att jämföra med resultaten i denna studie då båda har studerat kalkens inverkan på aggregatstorleksfördelningen i såbädden. Särskilt intressant blir Kindvalls studie då den även har studerat effekterna av kalkstensmjöl. Till skillnad från i denna studie hade kalkstensmjölet ingen tydlig effekt på aggregatstorleksfördelningen. En aspekt att beakta i den jämförelsen är att Kindvall i sitt försök inte tillförde mer än 2 ton CaO per hektar, vilket inte motsvarar mer än hälften av vad som tillförts i denna studie (4 ton CaO per hektar). Det är också värt att beakta det faktum att Blackert tillförde betydligt större givor (6,5 och 9,5 ton CaO per hektar) släckt kalk än vad som har gjorts i denna studie. En högre giva innebär att större mängder kalciumjoner kan frigöras i marken då kalkprodukten löses, vilket rimligen bör ge en starkare effekt.

Resultaten av denna studie och de jämförelser som gjorts ovan är tydligt exemplifierande för vilka variationer det kan förekomma i resultaten av kalkningsåtgärder på olika platser. Kalkgivan är en faktor som påverkar effekten, lerhalten i jorden en annan. Markförhållanden och metod vid spridning och nedbrukning är som tidigare nämnt även starkt avgörande faktorer för hur resultatet av den utförda kalkningsåtgärden blir. Det är också värt att nämna att denna studie endast har undersökt kalkens inverkan på aggregaten i såbädden under en odlingssäsong, år 2017. Detta gör att resultaten kan ha påverkats av några, för det specifika året, särskilda förhållanden i såväl mark som väder.

### **Aggregatstabilitet**

Resultaten från turbiditetsmätningarna visade att det fanns statistiskt signifikanta skillnader mellan de två kalkbehandlade leden och det obehandlade ledet ( $p = 0,000$ ). Vattnet som dränerades ur jordproverna från de två led som behandlats med strukturkalk och kalkstensmjöl hade en tydligt lägre turbiditet (grumlighet) än det vatten som kom ur den obehandlade jorden. Den lägre turbiditeten gav indikationer om lägre partikulära fosforförluster, vilket innebär att aggregaten i den jord som behandlats med kalkstensmjöl eller strukturkalk hade blivit stabilare.

I den studie som Blomquist m.fl. (2017b) genomförde mellan åren 2010 och 2014 konstaterades det att både strukturkalk som blandprodukt och släckt kalk som ren vara hade god effekt på aggregatstabiliteten. Att strukturkalken hade god effekt även i denna studie var därför enligt förväntningarna. Särskilt intressant var dock att kalkstensmjöl haft god effekt, inte bara på aggregatstorleksfördelningen, utan också på aggregatstabiliteten.

Ledet med kalkstensmjöl hade i snitt ett lägre värde för turbiditet än vad det strukturkalkade ledet hade, se figur 9. Det fanns dock ingen statistiskt säkerställd skillnad mellan de båda kalkade leden, varför några säkra slutsatser inte kan dras om skillnaden mellan dem, utan bara mellan de kalkade leden och det obehandlade ledet. I likhet med vad som nämndes tidigare gäller även här teorin om att de basutbytesreaktioner som sker då kalkstensmjölet löses i marken skapar aggregatstabiliserande effekter.

Värden för turbiditet varierade en del mellan de olika platserna. De värden som kom från turbiditetsmätningen på Vadensjö var lika varandra, och det gick inte att se lika tydliga skillnader mellan leden som på de andra försöksplatserna, se figur 10. Enligt uppgifterna i tabell 3 framgår det att nedbrukningen av kalkprodukterna skedde under blötare förhållanden, och att man vid nedbrukningen väntade en till två dagar mellan varje överfart. Inblandningen av kalken blev antagligen något bristfällig, vilket kan ha bidragit till att kalkprodukterna fick svag effekt på aggregatstabiliteten på Vadensjö. Värdena från Vadensjö har inte strukits ur den statistiska analysen, utan har fått vara med i variansanalysen för TURB 22, där alla sex försöksplatser har ingått. Om Vadensjö hade strukits ur denna analys hade skillnaderna mellan behandlade led och obehandlat led i figur 9 antagligen blivit ännu större.

## Resultatens säkerhet

Metoden för aggregatstorlekskategorisering byggde på att samtliga parceller inom en och samma försöksplats hade bearbetats likvärdigt innan provtagningen skedde. Den praktiska såbäddsundersökningen och provtagningen genomfördes av en och samma person, vilket gjorde att risken för variationer till följd av mänskliga faktorer minskade. Dessa aspekter bidrog till att göra svaren från denna undersökning mer säkra och representativa.

Turbiditetsmätningarna utfördes enligt en beprövad metod. För att vara säker på att jordproverna var representativa för det behandlingsled som de var tagna i mättes elektrisk konduktivitet i dräneringsvattnet från samtliga av dem. Detta bidrog till att höja resultatens trovärdighet.

De delar av försöket där metoden kan diskuteras gäller spridning och nedbrukning hösten 2015. Kalk och strukturskalk bör brukas ner och blandas in till det djup som jorden normalt brukas. Kalken har i denna studie inte brukats ner djupare än 18 cm på någon av platserna. På de flesta platser brukades kalken inte ner djupare än 15 cm. Enligt vad som beskrivs i tabell 3 och 4 har flera av försöksfälten plöjts både hösten 2015 och hösten 2016, alltså efter nedbrukningen av kalkprodukterna. Dessa fält plöjdes då 20–23 cm djupt, vilket innebär att jorden då brukades djupare än vad kalken blandades in. Det innebär att obehandlad jord har plöjts upp och blandats in i den jord som kalkats. På de platser som detta skedde spädades effekten av kalkbehandlingar antagligen ut något. Vid större inblandning av okalkad jord är det inte otänkbart att den mätbara effekten av kalkprodukterna kan ha sänkts till värden som inte längre skiljde sig signifikant från de obehandlade leden. Detta äventyrar inte de faktiska resultatens säkerhet, utan snarare dess trovärdighet som representativa fältförsök för kalkning och strukturskalkning.

## Framtida studier

Denna studie har som tidigare nämnt endast undersökt effekterna av strukturskalkning och kalkstensmjöl under ett år. För att få mer rättvisa och säkra resultat krävs återkommande provtagningar och undersökningar under flera år för att se om de båda kalkade leden på längre sikt skiljer sig åt.

Resultaten för kalkens inverkan på både aggregatstorleksfördelning och aggregatstabilitet har varierat mellan de olika platserna. Bland de faktorer som starkt bidrar till att avgöra resultatet kan markförhållanden och metod för nedbrukning ses som särskilt intressanta. Vidare studier på metoder för nedbrukning och inblandning av kalkprodukter hade därför varit mycket intressant att följa i framtiden.

## SLUTSATS

Detta examensarbete har genom provtagningar i fältförsök och litteraturstudier lett fram till följande slutsatser:

- Strukturalk och kalkstensmjöl hade positiv inverkan på aggregatstorleksfördelningen i såbädden på lättlorer. Försöken visade att jord som behandlats med kalkstensmjöl hade ett signifikant lägre innehåll av grova aggregat ( $>5$  mm) än jord som var obehandlad ( $p=0,016$ ). Strukturalk och kalkstensmjöl tenderade att göra jorden mer lättbrukad på våren, vilket gav en större mängd finjord ( $<2$  mm aggregat) utan att sätta in fler jordbearbetande överfarter.
- Behandling med strukturalk eller kalkstensmjöl kan öka aggregatstabiliteten i såbädden på lättlorer, vilket minskar risken för partikulära fosforförluster till vatten som dräneras genom matjordsprofilen.
- Kalkstensmjöl hade bättre effekt på aggregatstorleksfördelning (brukbarhet) och aggregatstabilitet (turbiditet) i såbädden på lättlorer än vad som var förväntat.
- Bra markförhållanden och rätt anpassad metod vid nedbrukning och inblandning är avgörande för att nå önskad effekt av den utförda kalkbehandlingen. Det är av stor vikt att kalkprodukten brukas ner och blandas in till det djup som jorden normalt brukas.

## REFERENSER

### Skriftliga

Adams, F. (red). (1984). *Soil acidity and liming*. 2 uppl. Madison: American Society of Agronomy, Inc.

Berglund, G. (1971). *Kalkens inverkan på jordens struktur*. Uppsala: Institutionen för lantbrukets hydroteknik, Lantbrukshögskolan.

Berglund, K., Blomquist, J. (2015). Strukturkalkning – bra för både mark och miljö. *Greppa Näringen - Praktiska råd*, nr. 23, 2015.

Berglund, K., Etana, A., Simonsson, M., Blomquist, J., Börjesson, G. (u.å.). *Är strukturkalkning lönsam för både lantbrukaren och miljön?* Uppsala: Institutionen för mark och miljö, SLU. (Slutrapport: SLF-projekt nr. H1233136).

Blackert, C. (1996). Plöjningsfri odling och strukturkalkning på lerjordar – effekter på markfysikaliska egenskaper och avkastning. Uppsala: Institutionen för markvetenskap, SLU. (Examensarbete, meddelanden från jordbearbetningsavdelningen, nr. 20, 1996).

Blomquist, J., Simonsson, M., Etana, A., Berglund, K. (2017a). Structure liming enhances aggregate stability and gives varying crop responses on clayey soils. *Acta Agriculture Scandinavia, section B – Soil & plant science 2018*, vol. 68, s. 311-322.

Blomquist, J. (2017b). *Gemensam slutrapport för projekten: Strukturkalkning för minskat fosforläckage i Skåne, Fosforreducering till Östersjön - strukturkalkning och mikronäring*. Agraria Ord & Jord. (Gemensam slutrapport: Lst nr. 501-1355-2015 och SJV nr. 4.1.18-3320/16).

Eriksson, J., Dahlin, S., Nilsson, I., Simonsson, M. (2011). *Marklära*. Lund: Studentlitteratur AB.

Eslamian, F., Qi, Z., Tate, M., Zhang, T., Prasher, S. (2018). Phosphorus loss mitigation in leachate and surface runoff from clay loam soil using four lime-based materials. *Water, Air & Soil Pollution*, 229:97.

Fogelfors, H. (red). (2015). *Vår mat – Odling av åker- och trädgårdsgrödor*. Lund: Studentlitteratur AB.

Kindvall, T. (1999). *Strukturkalkning på lerjordar – effekter på markstruktur och sockerbetsskörd*. Sveriges Lantbruksuniversitet. Institutionen för markvetenskap, avdelningen för lantbrukets hydroteknik. (Examensarbete, avdelningsmeddelande 99:1).

Kritz, G. (1983). *Såbäddar för vårstråsäd*. Uppsala: Institutionen för markvetenskap, Sveriges Lantbruksuniversitet. (Rapporter från jordbearbetningsavdelningen, 1983:65).



## Webbplatser

Berglund, K., Blomquist, J. (2002). *4.2.1 Effekter av strukturkalkning på skörd och markstruktur – Resultat från försök i sockerbetor och stråsäd*. Slutrapport: 4T – Tillväxt till tio ton. Tillgänglig: [http://4t.sockerbetor.nu/4T/Kap4\\_02\\_01.pdf](http://4t.sockerbetor.nu/4T/Kap4_02_01.pdf) [2018-04-22]

Hushållningssällskapet (u.å.). *Kalkprojekt*. Tillgänglig: <http://hushallningssallskapet.se/kalkprojekt/> [2018-03-29]

Sonesten, L. (2017). *Turbiditet/Grumlighet*. Institutionen för vatten och miljö, SLU. Tillgänglig: <https://www.slu.se/institutioner/vatten-miljo/laboratorier/vattenkemiska-laboratoriet/detaljerade-metodbeskrivningar/turbiditet/> [2018-05-22]

## Icke publicerat material

Hushållningssällskapet. (2017). *Fältkort för jordbruksförsök*. Opublicerat material. Avd. för odlingsutveckling. Kristianstad: Hushållningssällskapet Skåne.

Olsson, Å. (u.å.a). *Texturvärden försöksplatser*. Opublicerat material. Bjärred: Nordic Beet Research Foundation.

Olsson, Å. (u.å.b). *Kalkprojektet - Nedbrukning av kalk 2015*. Opublicerat material. Bjärred: Nordic Beet Research Foundation.

## BILAGA 1

### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Plats + block	17	0,166644	0,009803	7,41	0,000
Led	2	0,007683	0,003841	2,90	0,069
Error	34	0,044995	0,001323		
Total	53	0,219323			

**Figur 11.** Variansanalys (ANOVA) för den volymprocentuella andelen aggregat i storleken <2 mm i proverna från de olika försöksplatserna. De två faktorerna för variationsursprung är "plats + block" och "led".

### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Plats + block	17	0,047571	0,002798	9,92	0,000
Led	2	0,000401	0,000201	0,71	0,498
Error	34	0,009595	0,000282		
Total	53	0,057568			

**Figur 12.** Variansanalys (ANOVA) för den volymprocentuella andelen aggregat i storleken 2–5 mm i proverna från de olika försöksplatserna. De två faktorerna för variationsursprung är "plats + block" och "led".

### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Plats + block	17	0,07288	0,004287	3,81	0,000
Led	2	0,01046	0,005230	4,65	0,016
Error	34	0,03821	0,001124		
Total	53	0,12156			

**Figur 13.** Variansanalys (ANOVA) för den volymprocentuella andelen av aggregatstorlek >5 mm i proverna från de olika försöksplatserna. De två faktorerna för variationsursprung är "plats + block" och "led".

**Analysis of Variance (TURB 22)**

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
TRIAL	5	6485,7	1297,13	15,33	0,000	x
TREATM	2	1085,7	542,87	15,72	0,000	
BLOCK (TRIAL)	12	1019,6	84,97	2,46	0,031	
TRIAL*TREATM	10	166,6	16,66	0,48	0,884	
Error	23	794,3	34,53			

**Figur 14.** *Variansanalys för mätresultaten i mätning TURB 22.*

